TEORÍA DEL CAOS EN ELECTRÓNICA Y FOTÓNICA
CAMINOS A SEGUIR

J.A. MARTÍN-PEREDA
Catedrático del Departamento de Tecnología Fotónica de la ETSIT de Madrid, ha trabajado en temas relacionados con las comunicaciones ópticas y la Fotónica desde 1970. Ha impartido docencia de Doctorado en temas relacionados con la Filosofía de la Tecnología en su Departamento, y de asignaturas de grado en el de Humanidades de la Universidad Carlos III. Su actividad actual se centra en el estudio de los fenómenos sinergéticos de la Fotónica para su futuro empleo en arquitecturas de tratamiento de la información.

ANA GONZÁLEZ MARCOS
Miembro del Departamento de Tecnología Fotónica de la ETSIT de Madrid, colaboró en el estudio de la aplicación de láseres vibrónicos para su empleo en sistemas LIDAR. Posteriormente, se ha incorporado al desarrollo de estructuras de computación óptica y conmutación fotónica mediante el empleo de dispositivos no lineales, así como al de las interconexiones holográficas 2D. Ha colaborado con varios organismos de la Administración en el estudio de la evolución de la I+D en las Tecnologías de la Información de nuestro país en los últimos diez años.

Exponer algunas nociones acerca de la Teoría del Caos pasa en este artículo por una introducción al tema y el planteamiento del clásico circuito de Van der Pol, con los posibles comportamientos que ofrece, así como de su descripción mediante atractores. Esta teoría se aplica a un sencillo caso de circuito electroóptico realimentado, como ejemplo de lo que también sucede en Fotónica. Finalmente, se plantea su posible aplicación al caso de autómatas celulares para reconocimiento de patrones o como máquinas de "pensar".

Mucho tiempo ha pasado ya desde que los conceptos que circulaban alrededor de las comunicaciones ópticas dejaron de tener el encanto de lo nuevo. Las fibras ópticas, los láseres de semiconductor, los fotodetectores de avalancha, incluso ya las fibras amplificadoras de tierras raras, aparecidas muy recientemente [1], son ya tan sólo una parte del lenguaje cotidiano de los tecnólogos. Únicamente los muy alejados del tema, aquellos que caminan por otros mundos más o menos apartados, sienten aún una especie de idolatría por esos términos que no conocen pero que, a su entender, constituyen el mundo del mañana. Todos los que se mueven por la realidad del hoy saben que eso no es cierto, y que mucho de lo que algunos creen será el mañana es tan sólo una parte del ayer.

Cabría entonces pensar qué puede ser lo que nos aguarda en los próximos años, en ese tiempo que queda hasta que el presente siglo muera y dé comienzo el nuevo milenio. Hace bastantes meses, ya casi dos años [2], en estas mismas páginas se publicó un artículo en el que, como uno de los caminos posibles, se planteó el de la computación óptica. El camino señalado en aquella ocasión sigue siendo hoy tan dudoso como entonces. La mayor parte de las frases con las que se acababa el texto siguen siendo vigentes y, de hecho, algunas de las industrias americanas que más fondos habían invertido en ese segmento, en teoría emergente, empiezan a retirarse parcialmente de él (por lo menos, en los caminos que por esos años, no más de dos, se iban trazando). El tema sigue siendo de futuro, pero ya parece que los caminos por los que se debe avanzar han ser diferentes a los entonces trazados. Cosas hechas se están, en realidad, aprovechando para hacer "mestizajes" con la computación convencional, y quizás ocurra lo que ha ocurrido siempre en la Historia: que el futuro sea de la mezcla de las razas y nunca de las razas puras.

¿Cuáles podrían entonces presentarse como posibles líneas de futuro? ¿Qué panorámica conviene ir mirando con atención por si, dentro de muy poco, puede llegar a ser algo realmente de actualidad? Las respuestas, seguro, son tan variadas como augures se consulten pero, en un intento de lanzar la primera piedra, en estas páginas se van a desvelar algunas.

ALGUNOS CONCEPTOS QUE PARECÍAN CLAROS Y NO LO SON TANTO

Todos los que nos hemos movido por cualquiera de los campos de la Ciencia o la Tecnología, siempre hemos tenido presentes una serie de conceptos a los que, a base de manejarlos a diario, nos hemos acostumbrado, y cualquier duda que se presentase acerca de los mismos parecería algo por completo descabellado.

El primer concepto que todos hemos tenido siempre muy claro es de la "oscilación". Cualquier tipo de oscilación, fuera del tipo que fuera, era asimilada siempre a otro concepto que considerábamos equivalente. Este concepto era el de "periodicidad". Si un circuito era catalogado como oscilador llevaba consigo la noción de que la señal que emitía se repetía periódicamente. Y esto no admitía ninguna duda.

El segundo concepto por el que también nos hemos solido mover a lo largo de los años es el de "ruido". Todo ruido era considerado como un proceso por completo "no determinístico". Esto equivalía a decir que su origen y sus causas venían dadas por una serie de fenómenos que se alejaban por completo de todo proceso iniciado a través de unas leyes perfectamente determinadas y, en cierta manera, preestablecidas. Se sabía que algunos ruidos tenían unos ciertos orígenes pero que éstos estaban, en general, fuera del control de las leyes físicas que luego los controlaban.

¿Cuál es la situación actual, y que más adelante comentaremos? Los hechos con los que nos debemos mover a partir de ahora son, entre otros, que:

a) no hay ninguna razón para que las oscilaciones sean siempre periódicas,

b) el ruido puede surgir de un proceso determinístico,

c) existen sistemas determinísticos, de carácter newtoniano, que son "impredecibles", y

d) que estos últimos sistemas pueden llegar a producir un ruido determinístico.

Las consecuencias de todo lo anterior no se escapan a nadie, por muy alejado que se encuentre de los conceptos introducidos en los enunciados previos. Acercándonos a una terminología más convencional, podría sintetizarse lo anterior diciendo que hay fundadas razones para creer que ciertos tipos de ruido pueden proceder de causas absolutamente determinadas. Y que estas causas pueden proceder de situaciones que, en un principio, al estar por completo controladas, en la lógica que nos ha guiado hasta hoy, jamás podrían conducir a situaciones alejadas de comportamientos totalmente establecidos y claros.

Como consecuencia final de lo anterior, y a ello llegaremos en la conclusión de estas páginas, las situaciones de tipo caótico, que hasta hoy han sido consideradas como algo fuera de toda lógica y de todo control, pueden llegar a ser determinadas en su origen y, como consecuencia, eliminadas o, en su caso, aprovechadas de la manera que proceda.

Nos encontramos así en un nuevo terreno de la Ciencia y la Tecnología que ha adquirido muchas denominaciones pero una de las más establecidas es la que le engloba en el de Teoría de la Complejidad o de Estudio de las Vibraciones Caóticas.

Queda justificar, para acabar esta especie de preámbulo, las razones de que sea presentado aquí un tema cuya aparición, en principio, parece más adecuada en revistas de carácter más científico que técnico. Y entre las muchas razones que se pueden aducir es que uno de los primeros sistemas en los que se estudió el fenómeno del Caos fue en el célebre oscilador de Van der Pol, ampliamente conocido por todos los electrónicos. Y, adentrándonos en el terreno de la Fotónica, ha sido en este área en el que, desde mediados de los ochenta, el fenómeno ha sido estudiado con más interés, encontrándose desde en los simples láseres hasta en los dispositivos biestables ópticos [3], base hoy para la conmutación fotónica de las comunicaciones ópticas del mañana.

BREVES IDEAS DE SISTEMAS CAÓTICOS

El concepto de "caos" es algo por completo recurrente en la mayor parte de los campos de la Ciencia y la Técnica. Aunque desde tiempo inmemorial se ha asimilado a todo un conjunto de fenómenos de muy diverso cariz, sólo recientemente ha tomado cuerpo propio y ha podido ser asignado a un determinado número de casos. En todos ellos aparece, como motor de arranque, algún tipo de fenómeno no lineal. Y, lo que es mucho más importante, estos casos se encuentran tanto en el mundo de los sistemas hechos por el hombre como en el de los sistemas de seres vivos o de los existentes en la Naturaleza. Así, pueden descubrirse sucesos derivados del caos en los fluidos al encontrarse con un obstáculo, en la fibrilación de los ataques cardíacos, en el movimiento de un péndulo sometido a algún tipo de acción exterior, en la convección térmica o en determinados comportamientos sociales.

El problema que realmente se plantea es qué es lo que hoy se entiende como caos y cómo puede diferenciarse de otro tipo de fenómenos que podían catalogarse como aleatorios. Y, al mismo tiempo, qué interés puede tener su estudio, además del puramente científico del descubrimiento de sus causas. Aunque el llegar a arañar sólo una pequeña parte de su superficie implicaría un espacio muy superior al que aquí se dispone, trataremos de esbozar algunas líneas generales que puedan caracterizarlo para aquellos que aún no han tenido contacto con él.

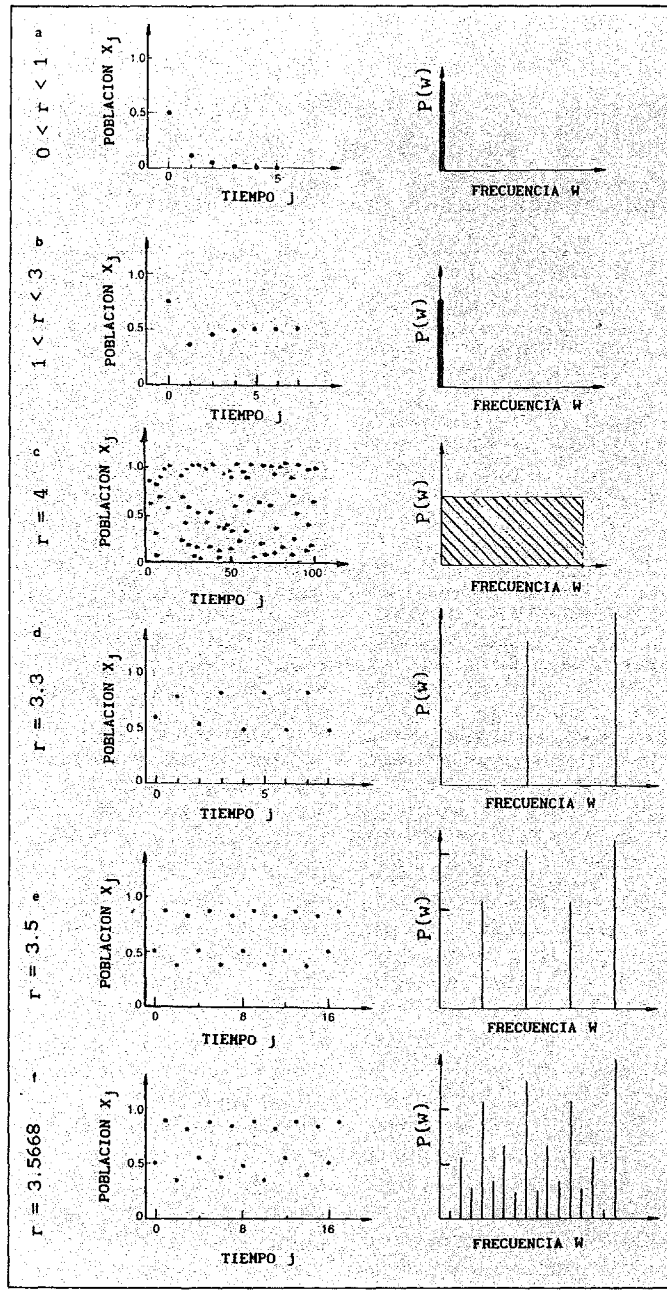


Figura 1. Comportamiento del crecimiento de una población cuya variación responde a la ecuación $x_{i+1} = r x_i (1 - x_i)$.

En un apartado posterior, pasaremos a ver algunas de sus posibles consecuencias para todo un conjunto de dispositivos y sistemas que, quizás, veamos o se vean en el futuro.

Una de las maneras más inmediatas de introducirse en lo que puede ser un comportamiento caótico y, lo que es

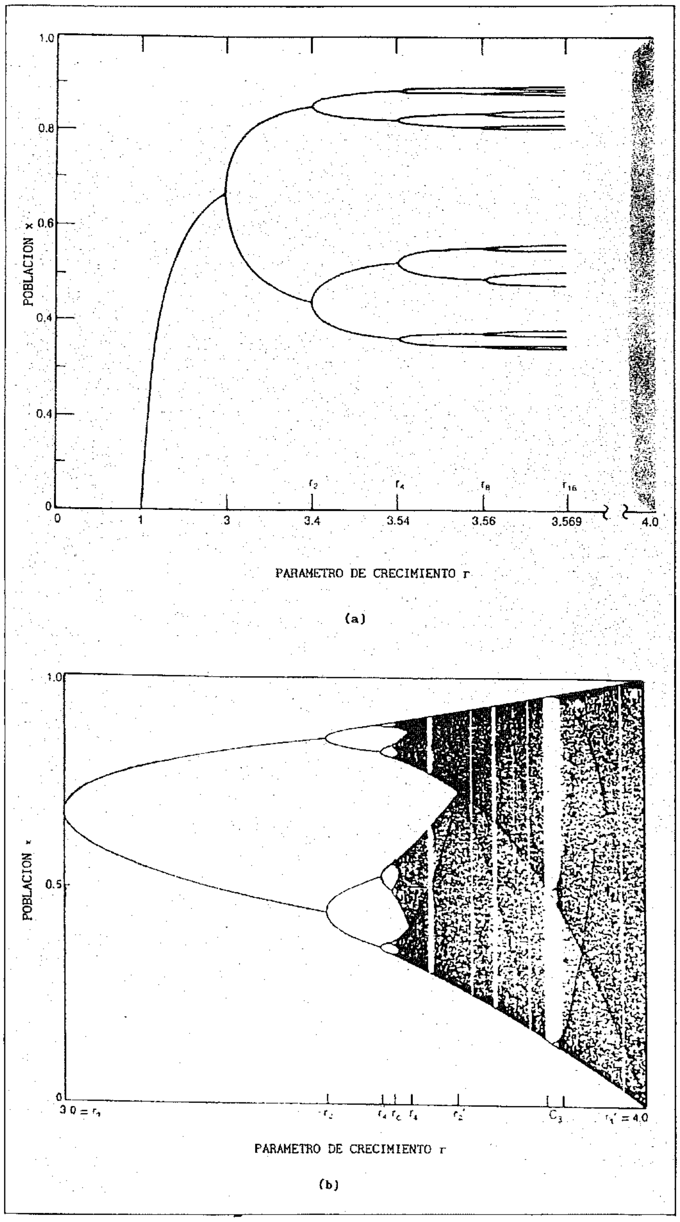


Figura 2. Transición desde un comportamiento cíclico a otro caótico . a) Valores estables de la población de la figura 1 en función del parámetro de crecimiento r. b) Transición desde un comportamiento cíclico a otro caótico.

mucho más importante, cómo se llega a él, la constituye uno de los ejemplos más clásicos del comportamiento de una determinada población. Si se considera que el valor que tiene la misma, referida al instante i-simo es x_i, y se supone que la que tendrá en un instante posterior $i+1$-simo viene dada por la sencilla expresión:

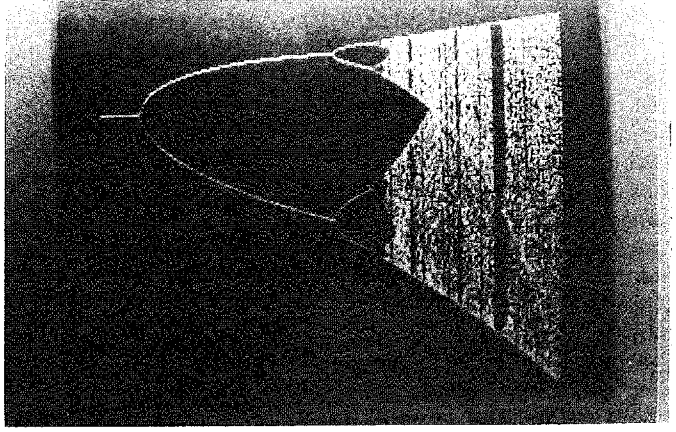
$$x_{i+1} = r\, x_i\, (1 - x_i)$$

en la que r, en principio, pueda tomar cualquier valor, de una manera iterativa podrá conocerse la situación de esta población en cualquier momento. La ecuación, como puede apreciarse, es aparentemente inofensiva y, de acuerdo con todos los cánones, sin razones para que diera lugar a comportamientos anormales. Pero los resultados reales, como vamos a ver, son muy otros. Si el valor de r fuera inferior a la unidad podría verse que, al cabo de no más de 5 etapas, la población habría descendido casi a cero. Si r, por el contrario, se encuentra entre 1 y 3, la población llega a un valor estable y allí se mantiene. Si adoptara el valor de 3,3, se vería que los valores que iban apareciendo en iteraciones sucesivas se alternaban de manera periódica. Aparece así lo que se denomina un ciclo doble. Si el valor que se le da es de 3,5, el ciclo pasa a ser cuádruple, con alternancia entre cuatro valores posibles de la población. Si se hace 3,5668, el ciclo sería ya de orden dieciséis. ¿Qué ocurre, finalmente, si el valor de r es exactamente 4? Pues el resultado es que el sistema ha entrado ya en una situación caótica y los valores que puede adoptar la población pueden ser cualesquiera en cualquier momento. Todo esto se refleja, de manera más clara, en la figura 1, en la que se representan los valores de la poblaciones para diferentes valores de r, tomando la unidad como población de partida, y cómo han ido evolucionando con el tiempo.

La forma más convencional de expresar lo anterior, y que es en la que normalmente aparece en todos los escritos de este tema, es la de la figuras 2a y 2b. En la primera se representa lo que va ocurriendo desde r = 0 hasta valores próximos a 4, y en la segunda lo que sucede a partir de r = 3. Como puede verse en esta última, entre r = 3 y un cierto $r = rc$, la población oscila entre 2, 4, 8, 16,... 2^n valores. En rc, la infinidad de líneas posibles se transforma en una infinidad de bandas, con los valores de la población oscilando de manera regular entre ellas, pero adquiriendo valores aleatorios en cada una. Por encima de rc, las bandas se unen, y para valores superiores a otro valor rd sólo existe ya una única banda. Este proceso es el que se denomina "camino hacia el caos". En la figura 3 se muestra la imagen real de este comportamiento.

En paralelo con lo anterior, se considera una diferente representación la que, de manera resumida, aparece en la figura 4. En ella se representa, en el eje de abscisas, el valor de x_i y, en el de ordenadas, el de x_{i+1}. Esta representación no es otra cosa que la resolución gráfica de la ecuación anterior. Como puede apreciarse, de acuerdo con el valor inicial que se adopte para x_i, se tardará más o menos para ►

Figura 3. Imagen real de la figura 2b.



alcanzar, si se alcanza, un valor final estable. En la figura 4 se han representado diferentes casos, que se corresponderían para diferentes valores del parámetro *r* y que, como es fácil de ver, determinaría la posición en la que la recta *xi* = xi+1 corta a la curva que representa a la función de la ecuación anterior. Según puede comprobarse, las soluciones posibles se corresponden con los puntos $x = 0$ y $x^* = 1 - 1/r$. Si $0 < r < 1$, sólo hay una solución, que es el origen y es estable. Si $r = 1$, el origen es marginalmente estable. Si $1 < r < 3$, el origen es inestable y el punto x^* es estable. Si $r = 3$, x^* es marginalmente estable y, finalmente, si $3 < r < 4$, ambos puntos son inestables y aparece, como puede apreciarse en la figura 4, duplicación de período. De manera análoga podrían presentarse las siguientes bifurcaciones, que ya se habían presentado en la figura 2.

Se concluye de todo lo anterior que, si la ecuación que determina un sistema cualquiera es más compleja que la presentada aquí, el camino que se seguirá hacia el caos podrá ser tan complejo y complicado como se pueda uno imaginar.

Se ha visto así que, si este caso sencillo ha dado pie para ver de qué manera, a partir de una situación en apariencia estable, se puede alcanzar un comportamiento caótico, un sistema que presente fuertes no linealidades lo dará con mucha mayor facilidad. Y, al mismo tiempo, hemos visto algo mucho más importante. Se ha verificado la importancia que poseen los valores iniciales de determinados parámetros y qué variaciones en ellos de unos órdenes de magnitud, que en otras circunstancias serían despreciables, aquí adquieren importancia fundamental.

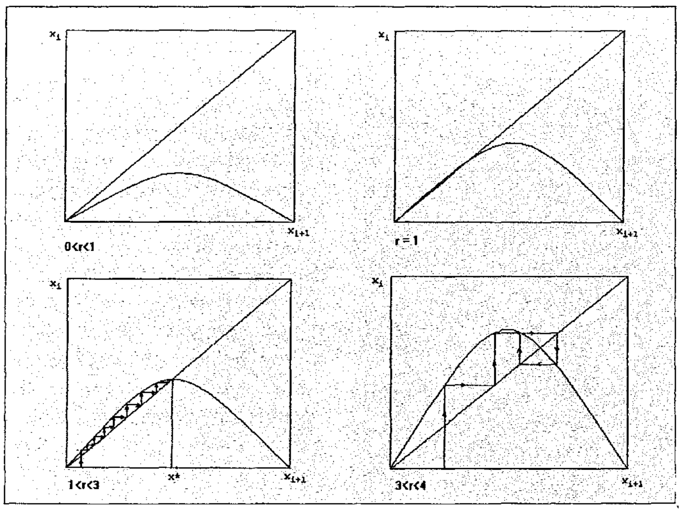


Figura 4. Diferentes tipos soluciones gráficas, para diferentes valores de r, correspondientes al caso de la figura 1.

Finalmente, y aunque sólo sea para terminar de aclarar estos conceptos, queremos volver aquí a diferenciar lo que sería un movimiento caótico de otro aleatorio. El segundo, el aleatorio, queda reservado a problemas en los que, de hecho, sólo se conocen ciertas medidas estadísticas de algunos de sus parámetros. Por el contrario, el caótico se centra en aquellos problemas determinísticos en los que no aparecen entradas o parámetros no previstos de antemano, sino sólo pequeñas modificaciones en los valores de los datos iniciales, datos que, por otra parte, pueden ser conocidos, dan lugar o no a fenómenos de ese tipo.

Visto lo anterior, podemos pasar ya a ver qué es lo que ocurre en determinados circuitos electrónicos que, en apariencia, pueden ser también totalmente inofensivos.

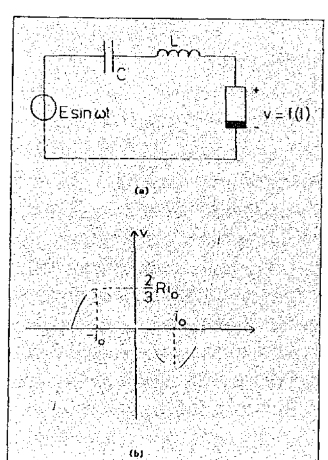
OSCILADOR FORZADO DE VAN DER POL

Un circuito como el de la figura 5a es conocido como oscilador forzado de Van der Pol y en él, además de los elementos convencionales que aparecen, se encuentra una resistencia no lineal cuyas características vienen dadas por la expresión:

$$f(i) = R\, i_o \left(-i/i_o + (i/i_o)^3/3\right)$$

donde i_o y *R* son una corriente y una resistencia normalizadas; en la figura 5b se da su significado. Este circuito satisface una determinada ecuación diferencial, en cuya forma no vamos a entrar aquí, pero cuyo comportamiento viene determinado por una

Figura 5. a) Esquema del circuito eléctrico del oscilador forzado de van der Pol. b) Característica de la resistencia no lineal del oscilador de Van der Pol.



cierta constante *M* cuyo valor viene dado por:

$$M = (L/CR^2)^{1/2}$$

y que es, de hecho, la que determina cuál va ser la evolución con el tiempo del circuito. Desde 1945 se determinó que los valores de *M* pequeños daban unas soluciones "no deseadas", y ya en 1981 se le consideró como prototipo de comportamiento caótico. Tanto desde un punto de vista matemático como empírico se encontraron, a partir de entonces, todas las características propias del caos que, de una manera simplificada, hemos visto en el apartado anterior, y más en concreto, todo el conjunto de bifurcaciones que aparecían en la figura 2.

El circuito de Van der Pol no es, como es lógico, el único que ha sido estudiado con comportamiento caótico. En 1987, en los Proceedings del IEEE, se publicó un número monográfico [4] dedicado a este tema, en el que aparecen numerosos ejemplos de familias de circuitos electrónicos, más o menos complejos, que mostraban el proceso que se ha indicado de transiciones desde el orden hasta el caos.

En todos ellos, y en los casos que se mencionarán después, aparece un concepto que, en la mayoría de las ocasiones, es sumamente útil para el estudio de los sistemas caóticos. Es el concepto de "atractor". Aunque por sí sólo tiene entidad suficiente como para dedicarle un número muy crecido de páginas, aquí únicamente le mencionaremos como herramienta de observación, primero, y como mecanismo de actuación, después. Pasemos, pues, a dar algunos de sus conceptos básicos y, para ello, seguiremos empleando el caso del oscilador de Van der Pol.

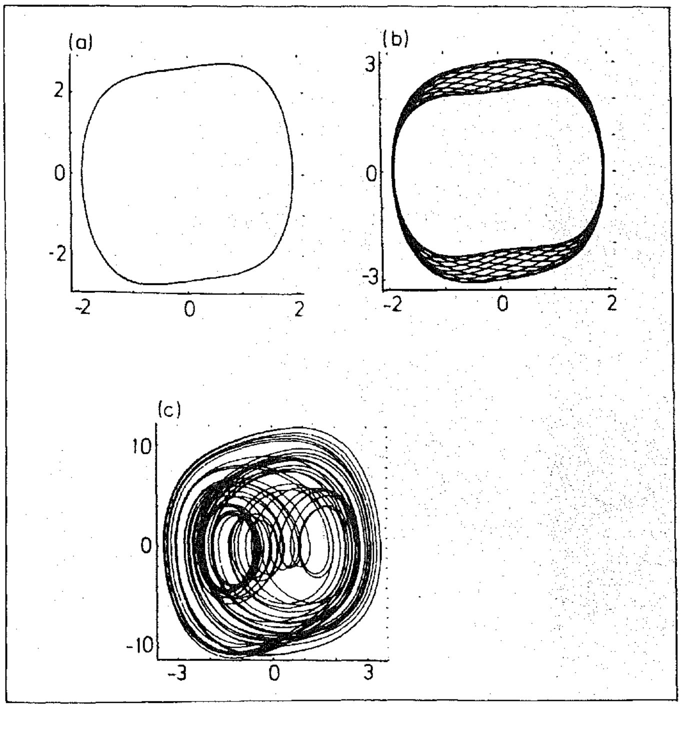
ALGUNAS NOCIONES DEL CONCEPTO DE ATRACTOR

La mayor parte de los sistemas físicos clásicos pueden englobarse, por lo que respecta a su variación con el tiempo, en tres grandes bloques: los que llegan a un equilibrio, los que se sitúan en un determinado movimiento periódico o con un ciclo limitado y, finalmente, los que efectúan un movimiento cuasiperiódico. Cualquiera de estas tres situaciones se corresponde con un estado final que se denomina "atractor", ya que ha aparecido como una especie de "atracción" hacia dicho estado. Un ejemplo del primer caso lo tenemos en cualquier movimiento en el que surge un amortiguamiento, del segundo en un péndulo y del tercero, en los latidos del corazón que, aunque puedan sufrir variaciones temporales, tendrán en general un estado hacia el que son "atraídos".

Pero además de estos atractores, que llamaremos clásicos, aparecen otros ligados a vibraciones no lineales y que pueden estar asociados a los sistemas caóticos que hemos visto antes. En este nuevo tipo, que se denomina "atractor extraño", deja de poder ser determinado de la forma que lo eran los anteriores dado que cualquier pequeña incertidumbre que surja en las condiciones iniciales conducirá a un comportamiento por completo diferente. Este nuevo concepto de atractor está, al mismo tiempo, ligado a otro tipo de estructura, también hoy muy en boga, que es la que se conoce como "fractal", y en la que no vamos a entrar aquí, aunque su importancia es casi tan significativa o más que la del atractor extraño.

La representación de un atractor se hace, en general, en un sistema de ejes, que en nuestro caso sencillo limitaremos a dos, y en los que el de abscisas es una cierta variable

Figura 6. Diferentes atractores resultantes del oscilador forzado de Van der Pol. a) Atractor periódico simple. b) Atractor cuasi-periódico. c) Atractor extraño, asociado con un comportamiento caótico.



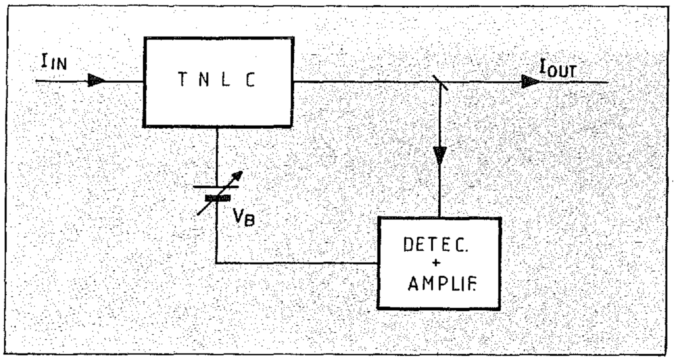


Figura 7. Esquema simplificado de un sistema biestable óptico híbrido.

del sistema bajo estudio, y el de ordenadas, su derivada o alguna magnitud relacionada con ella. Este plano, en Física, recibe el nombre de "espacio de las fases". Si hacemos esto para el oscilador de Van der Pol que hemos mencionado anteriormente, y se lleva al eje de abscisas un parámetro derivado de la corriente que circula por el circuito, y al que llamaremos x, y al de ordenadas su derivada, los atractores que encontraríamos serían como los de la figura 6. El de la figura 6a se corresponde con un caso de oscilador no forzado, esto es, con E=0,y se denomina atractor periódico. Podemos agregar que sería una típica oscilación normal. Valores crecientes de E conducen, entre otros muchos, a los dos casos presentados en las figuras 6b y 6c. El primero es un atractor cuasiperiódico, mientras que el tercero es un atractor extraño asociado con un comportamiento caótico. Como puede apreciarse en este último caso, los posibles valores de la corriente son infinitos, lo que le confiere unas propiedades muy diferentes a las de un circuito convencional. O, dicho de otro modo, en el circuito aparecen elementos que, en un principio, estaban fuera de lo esperado. Este hecho es el fundamental del tema que estamos viendo.

Sin entrar ya más en este tema, puede agregarse que el estudio de estos comportamientos "no convencionales" proporciona un conjunto de herramientas que todavía estamos muy lejos de llegar a controlar.

BIFURCACIONES EN SISTEMAS FOTÓNICOS CON REALIMENTACIÓN NO LINEAL

Como se dijo al principio de estas páginas, la fotónica ha constituido, desde 1980, uno de los campos más fértiles para el estudio de estos temas. El láser, en concreto, ofrece todo un conjunto de fenómenos como los anteriores que han sido publicados desde entonces en las más prestigiosas revistas. No vamos a entrar aquí en ellos porque se saldrían con mucho del planteamiento que aquí se ha pretendido hacer y del espacio disponible.

Sí puede ser interesante, no obstante, plantear el caso de sistemas ópticos biestables, con elementos no lineales distribuidos y que, en principio, son bastante más fáciles de explicar [5]. Un ejemplo muy sencillo es el que aparece en la figura 7. En ella, un haz láser incide con un cierto ángulo sobre un simple célula de cristal líquido, como las utilizadas normalmente en relojes y calculadoras. Parte de la señal óptica de salida es detectada por un fotodiodo, amplificada en un cierto valor y la señal eléctrica resultante, sumada a una cierta tensión constante, es la que se aplica a la célula de cristal líquido.

Como puede apreciarse, es un sencillo circuito electroóptico realimentado cuyo comportamiento debería, en principio, ser más o menos simple. Pero existe un hecho fundamental, y es que el cristal líquido es no lineal y, como consecuencia, el resultado del conjunto no puede ser catalogado como convencional. Dependiendo del valor de la realimentación introducida, la salida óptica pasa de ser una simple señal periódica, con una única frecuencia, a señales con frecuencias dobles, cuádruples, etc., de la inicial. Aparece así un resultado diferente al esperado y, de hecho, una forma fácil de controlar cómo se llegaría al caos.

Este tema está, en principio, abierto, y puede dar pie a aplicaciones, no establecidas aún con claridad, de este tipo de sistemas. No vamos a detenernos más en este terreno, porque daría para mucho más de lo que aquí nos hemos propuesto.

SISTEMAS DINÁMICOS DISCRETOS. EL CASO DEL AUTÓMATA CELULAR

Una de las características más usuales de la mayor parte de los fenómenos físicos es que llevan consigo un determinado umbral perfectamente definido. Por encima de dicho umbral, un cierto proceso posee unas características que pueden ser por completo diferentes de las que poseía por debajo del mismo. En la mayor parte de los casos también, la zona de transición es notoriamente pequeña. Ejemplos de este comportamiento son usuales en electrónica, como elementos básicos de los ordenadores y, recientemente, también en Fotónica para su uso en conmutación para comunicaciones ópticas.

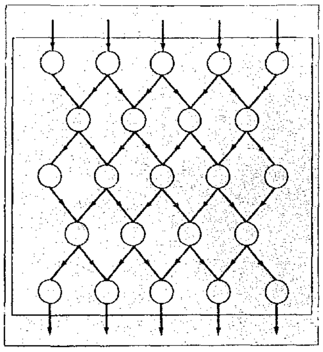


Figura 8. Distribución de procesadores formando un autómata celular, en el que cada elemento opera de acuerdo con los datos recibidos de sus vecinos más próximos.

La Biología no es, por otra parte, ajena tampoco a este tipo de fenómenos, y así, un determinado gen determina la síntesis de, por ejemplo, una proteína, mientras que, si se encuentra inactivo, la concentración de la misma es nula. Estos fenómenos, así como las variables involucradas, son los que, de manera amplia, conocemos como booleanos y han dado lugar a la superconocida lógica binaria. Su evolución con el tiempo viene dada por ecuaciones de tipo lógico que, en general, adquirirían una expresión de la forma:

$$X_{t+1} = F(X_t)$$

Estas ecuaciones serían las que sustituirían a las ecuaciones diferenciales que, sin plantearlas, hemos dicho en anteriores párrafos que podían caracterizar los comportamientos no lineales, y concretamente, caóticos, que aquí hemos estado considerando. La forma de F vendría dada por el tipo de problema considerado y, más en concreto, por los dispositivos involucrados. Dado que tanto X como F son funciones booleanas, las soluciones de la ecuación anterior suelen mostrarse de una manera muy clara, mediante las conocidas tablas de estados que no vamos a repetir aquí.

El caso que adquiere una nueva dimensión es el de una estructura compuesta por una malla de componentes booleanos idénticos, que interaccionan en el espacio. Este sistema es el que es ampliamente conocido como "autómata celular". En este caso, la ecuación que describiría a uno unidimensional sería de la forma:

$$X_{i,t+1} = F_i(X_{i-r,t}, X_{i-r+1,t}, \ldots, X_{i,t}, \ldots, X_{i+r,t})$$

que establece que la variable *X* de una determinada posición *i* viene determinada por los valores previos de las *2r+1* posiciones contiguas. De acuerdo con las reglas que vengan determinadas por las funciones F_i, la dinámica de los sistemas de este tipo, y todos los equivalentes de dimensiones superiores, pueden llegar a generar un muy amplio conjunto de comportamientos, tanto desde un punto de vista estructural como funcional. Este tema forma parte ya del acervo común del conocimiento de muchas ramas de la Tecnología.

El hecho fundamental que se presenta ahora, y que es el que debe encajar con todo lo que se ha planteado en anteriores apartados, es el de cómo se comportaría una configuración de elementos que podríamos llamar "procesadores", y que estuvieran distribuidos como, por ejemplo, aparecen en la figura 8. Estas estructuras están, de hecho, siendo empleadas en infinidad de aplicaciones y son conocidas por su capacidad para dar lugar a un cierto tipo de computación, con programación temporal, que responda a las funciones F que hayan sido programadas previamente en dicha red.

Pero ¿qué ocurriría si estas funciones se comportasen de la forma no lineal que hemos presentado a lo largo del presente artículo? Como veremos, podría llegarse a obtener todo un conjunto de propiedades "emergentes" o "nuevas", no incluidas en la programación inicial. O, dicho de otra manera, esta estructura, como un todo, sería en principio capaz de generar funciones diferentes de las que poseían cada una de las unidades individuales, antes de ser dispuestas en la configuración global. Se habría obtenido, en consecuencia, algo distinto a lo que se había programado en un principio.

La base para conseguir todo lo anterior es la existencia de los "atractores", que son los elementos característicos de los sistemas dinámicos disipativos. Un atractor que se corresponda con una estructura autoorganizativa, y que surja de una inestabilidad, conduce necesariamente a ese sistema a una propiedad colectiva que transciende a las de las subunidades individuales. De hecho, en un sistema de gran tamaño podrá existir un gran número de atractores. Dependiendo del valor que tenga el estímulo inicial, el sistema se encaminará a un tipo u otro de atractor y, consecuentemente, sus propiedades globales serán diferentes.

La aplicación más inmediata que pueden tener los anteriores conceptos es la de, por ejemplo, llegar a configurar máquinas que sean capaces, de verdad, de aprender a reconocer, de una manera fiable, diferentes tipos de señales de entrada, aunque estas señales de entrada estén por csompleto distorsionadas. O de tomar

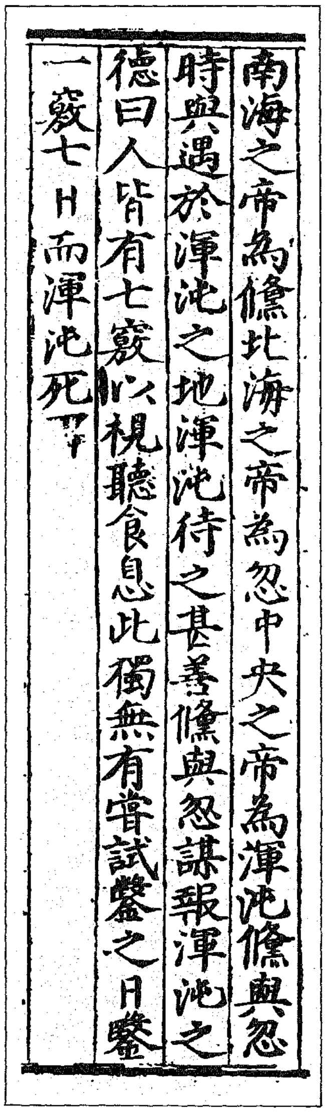

南海之帝為儵北海之帝為忽中央之帝為渾沌儵與忽
時與遇於渾沌之地渾沌待之甚善儵與忽謀報渾沌之
德曰人皆有七竅以視聽食息此獨無有嘗試鑿之日鑿
一竅七日而渾沌死

Figura 9. Historia de Caos, según Chuang Tsu.

"decisiones" no previstas con anterioridad gracias a los infinitos valores que se pueden alcanzar si los atractores extraños son de carácter caótico.

El papel que deben desempeñar así estos atractores en la computación de dentro de unos años y, por extensión, en la posibilidad de "pensar", parece fuera de toda duda. Gracias a ellos, la Teoría de Sistemas Dinámicos y la Física de Sistemas alejados del equilibrio, por un lado, y las Ciencias de la Computación y del Conocimiento, o las Redes Inteligentes de Comunicaciones, por otro, tienen un nexo común que las engloba a todas. Los resultados que puedan surgir de esta síntesis, en parte inesperada, están sin duda muy lejos de poder ser hoy anticipados. Pero, con toda seguridad, están ahí.

Es preciso señalar, finalmente, que aunque este tema en concreto tiene una historia parcialmente más intensa en Electrónica, será en Fotónica donde, quizás, pueda adquirir una mayor fuerza. Y esto se debe a la propiedad innata de la óptica de trabajar en paralelo, de una forma natural, hecho que la Electrónica no tiene. De esto ya hablamos algo en [2].

CONCLUSIONES, SUPONIENDO QUE SEAN POSIBLES

Las líneas anteriores no han sido sino un mero bosquejo de un campo que se encuentra en plena efervescencia. De él no se han dado más que unas muy ligeras pinceladas. Aunque existe una serie de libros de carácter aparentemente divulgativo del tema, los que realmente describen lo que está ocurriendo se encuentran en un estado que, por el momento, y para los no iniciados, puede resultar algo duro para navegar por ellos. Poco a poco, cuando algunos de los conceptos que están en juego empiecen a ser parte del lenguaje común, será el momento de seguir avanzando por él en estas páginas. Por el momento, y aunque sólo sea como una forma de intentar abrir una ventana, estas líneas son una primera tentativa.

Es de esperar que esta apertura de una nueva ventana no sea como lo que ocurre en una vieja historia china, de Chuang Tsu, que vivió entre el año 369 y el 286 antes de Cristo. Es la que aparece en la figura 9 y cuya transcripción aproximada es la siguiente:

"El emperador del mar del Sur se llamaba Shu, que significa Breve, el del mar del Norte se llamaba Hu, que significa Rápido, y el emperador de la región central se llamaba Hun-tun, que significa sCaos. Shu y Hu se reunían, de tiempo en tiempo, en el territorio de Hun-tun y éste les trataba con toda generosidad. Shu y Hu comentaron cómo podían corresponder a la generosidad de Hun-tun. Todos los hombres, dijeron, tienen siete orificios por los que pueden ver, oír, comer y respirar. Pero Hun-tun no tiene ninguno. Y decidieron abrirle los siete orificios. Cada día le fueron abriendo un orificio, pero al llegar al séptimo Hun-tun murió" [5].

Las ventanas del Caos comienzan también a abrirse poco a poco. Sería bueno que todos las vayamos abriendo con cautela pero que, a pesar de lo que pueda pasar, no dejemos de seguir haciéndolo.

REFERENCIAS

[1] J.A. Martín-Pereda, "Comunicaciones Ópticas: Situación y perspectivas". Mundo Electrónico, Mayo 1989, pp 63-72.

[2] J.A. Martín-Pereda y Ana González Marcos, "Panorámica global de la Computación Óptica: Una visión parcial". Mundo Electrónico, Julio 1990, pp 55-66.

[3] J.A. Martín-Pereda, M.A. Muriel y J.M. Otón, "Biestabilidad óptica: un nuevo camino para el láser". Mundo Electrónico, Septiembre 1981, pp. 139-145.

[4] Proceedings of the IEEE. Número especial dedicado a "Chaotic Systems". Agosto, 1987.

[5] J.A. Martín-Pereda y M.A. Muriel, "Self-Beating Instabilities in Bistable Devices" y "Empirical and Analytical Study of Instabilities in Hybrid Optical Bistable Systems". En "Optical Bistability 2". Eds. C.M. Bowden, H.M. Gibbs y S.L. McCall. pp.135-151. Plenum Press. N.Y. 1984.

[5] B. Watson, "The Complete works of Chuang Tsu". London. Columbia Univ. Press. 1968.